

Rôle du contrôle exécutif dans le raisonnement par analogie chez l'enfant et le primate non humain

Role of executive control in children's and non human primates' analogical reasoning

Laure Minier^{1*}

Agnès Blaye¹

Anaïs Maugard^{1,2}

Joël Fagot^{1,2}

Yannick Glady³

Jean-Pierre Thibaut³

(1) Laboratoire de Psychologie Cognitive, CNRS UMR7290, Aix-Marseille Université Pôle 3 C
Bâtiment 9 Case D 3, place Victor Hugo 13331 Marseille Cedex3

(2), Brain and Language Research Institute, 3 place Victor Hugo, Bât B, Case D, 13331 Marseille
Cedex,

(3) Laboratoire d'Etude de l'Apprentissage et du Développement, UMR 5022 Université de
Bourgogne Pôle AAFE Esplanade Erasme BP 26513 21065 Dijon Cedex

Auteur correspondant:

Téléphone : 04 13 55 09 65

Télécopie : 04 13 55 09 65

Email : minier.laure@gmail.com

Note. Les travaux des co-auteurs présentés dans ce manuscrit ont été réalisés pour une large part grâce au soutien de l'Agence Nationale pour la Recherche au projet ANAFONEX (ANR-10-BLAN-1908-01)

Résumé

Le raisonnement par analogie (RA) est une capacité cruciale de la pensée humaine. Plusieurs théories ont été proposées pour comprendre son émergence chez l'enfant, évoquant successivement le développement des compétences logiques puis la connaissance nécessaire des relations mises en jeu. Dans cette revue, nous proposons un point de vue alternatif suggérant que les capacités de RA dépendent de l'efficacité du contrôle exécutif. Dans une perspective comparative, nous présentons un ensemble de données récentes qui étayent le rôle de l'inhibition, de la flexibilité et de la mise à jour en mémoire de travail dans le RA chez l'enfant et chez le primate non humain. Les travaux chez l'enfant suggèrent que les connaissances, à travers la qualité des représentations, et les capacités de contrôle doivent être considérées en interaction pour rendre compte des processus en jeu dans l'analogie.

Mots clefs : représentations ; inhibition ; mise à jour en mémoire de travail, flexibilité, singe

Abstract

Analogical reasoning (AR) is a corner stone of human cognition. Two main theories have historically been proposed to account for the ontogeny of AR. They propose that analogical skills are constrained by children's logical skills or limited knowledge of the relations to be considered. We adopt an alternative perspective in this review paper suggesting that AR abilities depend on the efficiency of executive control. We present convergent data collected in children and monkeys highlighting the role of three main executive functions : inhibitory control, cognitive flexibility and working memory updating. The analysis of children's reasoning suggests that the contribution of relational knowledge and executive control to analogical reasoning cannot be considered independently.

Key words : representations, inhibition ; working memory updating ; flexibility ; monkey

Raisonnement par analogie consiste à transférer une structure relationnelle extraite d'une situation connue, appelée source, vers une situation nouvelle, appelée cible (Gentner, 1983; Gentner, Holyoak & Kokinov, 2001). Nous faisons fréquemment appel à ce type de raisonnement lorsque nous éprouvons l'intuition soudaine et spontanée que la situation rencontrée ressemble à une expérience antérieure. Si cette mise en parallèle s'initie souvent, et plus facilement, par des ressemblances de surface entre les deux situations, le raisonnement par analogie (RA) permet d'aller au-delà des divergences perceptives et d'extraire une structure relationnelle commune à ces deux situations (Dunbar & Blanchett, 2001). Aussi, en permettant le transfert de connaissances dans un contexte nouveau, le RA s'avère critique pour de nombreux apprentissages, la résolution de problèmes et l'interprétation de situations.

Plusieurs tâches ont été proposées afin d'étudier le développement du RA. Celles-ci diffèrent des analogies quotidiennes dans la mesure où les participants ne sont pas libres d'évoquer une situation source mais celle-ci leur est imposée. Néanmoins, ces tâches constituent un outil pertinent pour étudier précisément les paramètres impliqués dans le raisonnement (nature des relations, complexité, etc.). On retrouve ainsi les analogies proportionnelles évaluées par des tâches de type $A:B :: C:D$ dans lesquelles il s'agit de trouver le terme D qui s'associe au terme C selon la même relation que celle existant entre les termes A et B (e.g., Goswami & Brown, 1989 ; Goswami & Brown, 1990 ; Thibaut, French, & Vezneva, 2010a ; Thibaut, French, & Vezneva, 2010b) ou encore les tâches d'appariement relationnel requérant la sélection de la paire ou triade d'objets entretenant les mêmes relations qu'une paire/triade source. Il existe également des tâches de résolution de problèmes dans lesquelles les participants doivent utiliser la solution d'un problème connu dans une situation nouvelle (e.g. Cayol, Bastien-Toniazzo, & Blaye, 1997; Chen, Sanchez, & Campbell, 1997; Crisafi & Brown, 1986) ou encore les tâches d'analogie entre scènes visuelles qui consistent à trouver des correspondances entre les éléments de scènes imagées (e.g. Markman & Gentner, 1993; Richland, Morrison, & Holyoak, 2006).

Historiquement, trois positions théoriques principales peuvent être distinguées concernant le développement du raisonnement par analogie. La première est celle de Piaget (e.g. Inhelder et Piaget, 1955) qui situait l'émergence du RA au stade des opérations formelles (11-12 ans) et l'attribuait au développement général des compétences logiques. En effet, le RA conduisant à « mettre en relation des relations » semble fondé sur les opérations de deuxième ordre caractéristiques de ce stade. A cette théorie, se sont opposées celles de Goswami (Goswami & Brown, 1989 ; 1990) et de Gentner (1988). Ces deux auteurs s'accordent pour reconnaître le rôle critique de la connaissance des relations dans le succès du RA et considèrent que les jeunes enfants sont capables d'un tel raisonnement bien avant le niveau opératoire formel, dès lors que les relations impliquées leur sont familières. Ces deux thèses s'opposent en revanche sur leur vision du développement du RA. Selon la théorie de la « primauté relationnelle » (*relational primacy*) de Goswami, l'insuffisance des connaissances relationnelles serait le seul frein à la mise en œuvre d'un RA chez le jeune enfant. Pour Gentner, le développement donne lieu à une « bascule relationnelle » (*relational shift*) avant laquelle les jeunes enfants seraient seulement capables de raisonner sur des similitudes locales entre attributs d'objets. De ce fait, ils ne parviendraient pas à l'alignement structural permettant la mise en correspondance des structures relationnelles source et cible. Cette bascule relationnelle ne se produirait pas nécessairement aux mêmes âges selon les domaines de relations impliqués, puisqu'elle résulterait du développement des connaissances dans ces domaines, développement dépendant des expériences de l'enfant.

Si les études de Goswami et Brown (Goswami & Brown, 1989; 1990) ont fortement marqué l'étude du développement du RA, il reste que leur interprétation est sujette à caution. Ces travaux suggéraient par exemple que les enfants de 4 ans sont capables de sélectionner un item analogique même quand celui-ci est mis en concurrence avec d'autres items associés au terme C (cf. Figure 1). Pourtant, lorsque les expérimentateurs demandaient de choisir un item associé au terme C sans présentation préalable de la paire A:B, l'item analogue était également majoritairement choisi (bien que significatif, l'écart entre tâche d'analogie et tâche contrôle sans présentation de la paire source était de moins de 10%, cf. Thibaut, French, & Vezneva, 2010b). Ainsi, cette configuration particulière d'évaluation n'atteste pas totalement de la compétence des enfants à effectuer un véritable RA, c'est-à-dire à tenir compte de la

relation source. En effet, il semble plus probable que les autres items proposés présentaient une force d'association moindre avec C que celle de la réponse analogique, permettant ainsi la sélection de la réponse attendue.

<Insérer Figure 1>

Dans la suite de cet article nous présentons des travaux conduits chez l'enfant montrant qu'au-delà du développement des connaissances relationnelles, l'efficacité croissante du contrôle exécutif peut expliquer le développement du RA. Ce point de vue est étayé à la fois par des données corrélationnelles et par des résultats montrant que les performances analogiques des enfants d'un âge donné diffèrent en fonction du coût exécutif imposé par la tâche. Toutefois connaissances et contrôle ne sont pas à considérer comme deux facteurs indépendants, ces données montrent qu'il existe un lien étroit entre la qualité des représentations des relations dont disposent les enfants et l'efficacité du contrôle exercé lors du RA. Enfin, nous accompagnons cet exposé développemental d'études effectuées sur un groupe de primates non humains. L'approche comparative s'inscrit dans la perspective d'une continuité phylogénétique entre les systèmes cognitifs des primates non humains et de l'humain (Parker & McKinney, 1999 ; Maestriperi, 2005). Elle suppose que certains processus qui sous-tendent le RA puissent être communs à l'ensemble des primates. A cet égard, les primates non humains constituent des modèles d'étude intéressants car, bien que dépourvus de langage et donc d'outils d'organisation sémantique des connaissances, ils font preuve d'un contrôle exécutif efficace pour traiter certains stimulus et s'avèrent capables de résoudre des tâches d'analogies perceptives. Nous présentons des données récentes obtenues chez les babouins et établissant des corrélations entre leur niveau de contrôle exécutif et leurs performances en analogie. Dans cette perspective comparative, nous porterons une attention particulière aux tâches d'analogie à 4 termes (A:B :: C:D et appariement relationnel), celles-ci étant accessibles aux enfants comme aux primates non humains.

1. Le coût exécutif du RA

On considère que le contrôle exécutif permet le guidage des conduites vers les buts visés dès

lors que l'on sort des activités routinières, largement automatisées. Ce contrôle permet notamment de répondre de façon adaptée aux changements de situation (Chevalier, 2010 ; Chevalier & Blaye, 2006 ; Cragg & Chevalier, 2012 ; Harlow, 1868 ; Norman & Shallice, 1986 ; Miyake, Friedman, Emerson, Witzl, & Howerter, 2000). On considère avec Baddeley (Baddeley & Hitch, 1974) que ce contrôle s'exerce en mémoire de travail. Les liens entre mémoire de travail et RA ont déjà fait l'objet d'investigation. Halford, Wilson et Philips (1998, 2010) envisagent que les progrès du RA durant l'enfance pourraient être, au moins partiellement, attribués au développement des capacités de la mémoire de travail. Ce développement se traduit notamment par la possibilité de traiter des relations impliquant de plus en plus d'éléments en parallèle. Pour tester cette hypothèse, Richland et al. (2006) ont manipulé la complexité des relations en jeu dans une tâche d'analogie entre scènes visuelles. Les participants âgés de 3-4, 6-8 et 13-14 ans devaient trouver dans une scène cible (e.g. un garçon qui court après une fille) l'élément jouant le même rôle que celui pointé dans une scène source (e.g. un chat qui court après une souris dans un jardin). Les scènes visuelles présentées comprenaient 2 ou 3 éléments par relation (un chat poursuivant une souris vs. un chien poursuivant un chat qui poursuit une souris). Les résultats montrent un effet délétère de la complexité des relations qui tend à diminuer avec l'âge des participants. Un tel effet a également été pointé chez des populations dont les capacités de mémoire de travail sont diminuées, notamment des personnes âgées (Viskontas, Morrison, Holyoak, Hummel, & Knowlton, 2004) et des patients cérébro-lésés (Morrison, Krawczyk, Holyoak, Hummel, Chow, & Miller, 2004). Néanmoins, cette interaction entre l'âge et la complexité des relations en termes de capacités de mémoire de travail nécessiterait d'être précisée en considérant le rôle des fonctions de contrôle spécifiques.

Parmi les différentes fonctions de contrôle partiellement indépendantes, on distingue principalement (Miyake et al., 2000) (a) l'*inhibition* qui permet d'ignorer une information ou de bloquer une réponse prépondérante mais non pertinente pour privilégier l'issue pertinente ; (b) la *flexibilité* qui réfère au fait de pouvoir alterner de focus attentionnel, de perspective ou de réponse et (c) la *mise à jour en mémoire de travail* qui permet de rafraîchir et/ou réviser les représentations maintenues en mémoire de travail. L'analyse des processus en jeu dans une tâche telle que l'analogie à

quatre termes (i.e. $A:B :: C:D$ ou appariement relationnel) suggère que ces différentes fonctions pourraient être directement impliquées. Le participant doit encoder les termes de l'analogie pour construire une représentation de la paire source (AB) en mémoire de travail et la maintenir durant le processus d'appariement afin de rechercher, en mémoire ou dans un ensemble de solutions proposées, la cible correspondante. Durant cette recherche, le participant doit ignorer les relations non pertinentes présentes dans l'ensemble de solutions (distracteurs) ou qui lui viendraient spontanément à l'esprit, afin de retenir le couple CD exprimant la même relation que les termes A et B.

Il semble donc que des processus d'inhibition et de résistance à l'interférence d'informations distractrices doivent ici intervenir. De plus, lors de la recherche de la solution parmi un ensemble d'options, le participant pourrait ne pas trouver d'item correspondant à la représentation qu'il s'est construit de la relation source. Dans ce cas, il doit réviser sa représentation et effectuer une nouvelle recherche. Ainsi, des capacités de flexibilité cognitive sont susceptibles d'être requises. Enfin, pour produire un appariement relationnel correct, sans céder aux sources d'interférence, il est nécessaire de maintenir le but même de la tâche d'analogie en mémoire de travail. Celui-ci doit conduire au maintien de la représentation de la relation source à un niveau d'activation suffisant pour s'en servir de critère de sélection de la réponse.

Cette analyse permet de reconsidérer l'interprétation du progrès développemental en RA proposée par Gentner (1988). La centration des jeunes enfants sur des appariements locaux entre attributs d'objets plutôt que sur des appariements de structures relationnelles (pour des synthèses, voir Gentner, 2003 ; Gentner & Rattermann, 1991) pourrait traduire un contrôle inhibiteur encore peu efficace. En effet, percevoir la similarité des relations entre les situations source et cible implique d'ignorer tout ce qui a trait aux objets eux-mêmes pour ne conserver que ce qui les unit (les relations). Or, les appariements entre attributs reposent souvent sur des similitudes perceptives plus saillantes pour les jeunes enfants que des appariements relationnels nécessitant un traitement plus approfondi. Ainsi, la bascule relationnelle identifiée par Gentner comme permettant l'entrée dans le RA pourrait être le marqueur d'un développement des capacités d'inhibition.

Le rôle de l'inhibition a été directement testé dans l'étude de Richland et al. (2006). Un élément de la scène visuelle cible jouait le rôle de distracteur (un chat allongé près des enfants qui jouent) parce qu'il était perceptivement similaire à l'un des éléments de la scène source (le chat qui court). Lorsqu'ils réalisaient la tâche sans distracteur perceptif, les performances des enfants de tous âges étaient supérieures au hasard, démontrant ainsi leur capacité à traiter de manière correcte l'identité relationnelle des stimuli. En présence d'un distracteur, les performances des plus jeunes (3-4 et 6-7 ans) déclinaient fortement alors que les plus âgés (13-14 ans) semblaient insensibles à ce distracteur. Une telle interaction illustre comment des progrès en inhibition, par ailleurs bien établis sur cette tranche d'âge (Best & Miller, 2010 ; Cragg & Nation, 2008 ; Garon, Bryson, & Smith, 2008), peuvent rendre compte de l'amélioration des performances en analogie avec l'âge. Thibaut et ses collaborateurs ont récemment précisé le rôle du coût inhibiteur lié à la présence d'options de réponses distractrices dans une tâche de type $A:B :: C:D$ (impliquant des relations perceptives, Thibaut, French, & Vezneva, 2010a ou sémantiques, Thibaut, French, & Vezneva, 2010b; Thibaut, French, Vezneva, Gérard & Glady, 2011). Ces études ont établi que les performances en analogie diminuaient avec l'augmentation du nombre de distracteurs, autrement dit avec la quantité d'informations non pertinentes à ignorer. Par ailleurs, les performances des enfants étaient plus faibles lorsque les distracteurs étaient sémantiquement reliés au terme C plutôt que perceptivement similaires à celui-ci. On peut envisager que la communauté de nature entre relations à privilégier et relations à inhiber produise cet effet délétère sur la performance parce qu'elle accentue l'interférence et donc le coût de l'inhibition à mettre en œuvre. Enfin, leur hypothèse sur le rôle de l'inhibition est corroborée par une corrélation positive entre performances à un test d'inhibition (Stroop Jour-Nuit, Gerstadt, Hong & Diamond, 1994) et performances en analogie chez les enfants de 4 et 5 ans.

La représentation et le maintien du but de la tâche d'analogie pourraient être également des éléments critiques du RA. Des travaux récents sur le développement des fonctions exécutives (Blaye & Chevalier, 2011 ; Marcovitch, Boseovski & Knapp, 2007 ; Towse, Lewis, & Knowles, 2007) suggèrent que la représentation du but de la tâche puis sa gestion en cours de résolution constituent des aspects déterminants de l'efficacité du contrôle exécutif. Or, quelle représentation du but se

construisent les enfants dans une tâche de RA ? Comprennent-ils l'importance d'une extraction de la relation source afin de s'en servir de critère de sélection de la réponse ? Si cette compréhension existe - le but étant souvent explicitement formulé dans les consignes - dans quelle mesure parviennent-ils à contrôler la mise en œuvre de leur raisonnement conformément à ce but ? Une étude récente de Thibaut & French (soumis, voir aussi Thibaut, French, Mussault, Gérard & Glady, 2011) apporte des éléments de réponse à ces questions. Les auteurs ont enregistré les mouvements oculaires des enfants, adolescents et adultes testés sur une tâche de type $A:B :: C:D$. La stratégie de résolution des adolescents et des adultes consiste à extraire la relation source (ils passent du temps à observer A:B) avant de chercher à l'instancier en situation cible (cf. Figure 2). Au début de la tâche, les enfants (5 et 8 ans) passent moins de temps à analyser la paire A:B et plus de temps à fixer le terme C et l'ensemble des solutions proposées (la réponse analogique, un distracteur sémantiquement lié à C et deux images non reliées à C). Par ailleurs, les essais réussis par les enfants sont ceux qui, en moyenne, ont donné lieu à une analyse plus longue de la paire A:B au début de l'essai et à un plus grand nombre d'allers-retours entre le distracteur sémantiquement lié à C et la solution analogique, suggérant une comparaison plus approfondie des deux termes. Il semble donc qu'il y ait un développement de la compréhension du but de la tâche et/ou de la gestion de ce but sous la forme d'une séquentialisation pertinente des prises d'informations sur les différents éléments du problème. Le rôle de la gestion des buts dans le RA est d'ailleurs étayé par l'étude de Chuderska et Chuderski (2009) corrélant l'efficacité de différentes fonctions exécutives avec les performances en analogie chez des adultes. La capacité de gestion des buts était évaluée par la tâche de Duncan, Emslie, Williams, Johnson & Freer (1996) dans laquelle les participants doivent placer un objet à gauche ou à droite de l'écran en fonction d'un symbole qui indique que le côté cible est identique ou bien opposé au côté cible de l'essai précédent. Pour catégoriser correctement un objet lors d'un essai, les participants doivent donc maintenir en mémoire le côté cible (but) de l'essai précédent et actualiser ce but en fonction du symbole donné sur l'essai en cours. Les performances des participants sur cette tâche ainsi que celles obtenues sur une tâche d'inhibition s'avèrent les meilleurs prédicteurs des performances analogiques. Aussi, selon les auteurs, deux aspects exécutifs interviendraient dans la représentation et la manipulation des relations dans une tâche d'analogie : un aspect exécutif proactif de gestion et

d'application du but du RA et un aspect réactif d'inhibition des associations non pertinentes pour le but.

<Insérer Figure 2>

2. Interaction entre représentation de la relation et contrôle exécutif chez l'enfant

Les travaux évoqués ci-dessus permettent de distinguer deux approches: l'une mettant l'accent sur les représentations, liées à la connaissance des relations en jeu, l'autre portant sur le rôle de différentes composantes du contrôle exécutif. Les études les plus récentes tendent à montrer que c'est l'interaction entre ces deux aspects qui sous-tend le RA, tout particulièrement chez les enfants où le contrôle n'est pas pleinement efficient et où les connaissances ne sont que partiellement construites. Cette interaction se manifeste doublement : d'une part à travers le rôle des aspects exécutifs dans l'élaboration de la représentation de la source, et d'autre part à travers la modulation du contrôle requis pour la résolution selon la qualité de la représentation de la source et de la cible. En effet, « *le contrôle ne s'exerce pas à vide : on ne contrôle bien que ce que l'on conceptualise clairement* » (Maintenant & Blaye, 2008, p 689) : le transfert analogique sera d'autant mieux effectué que les structures relationnelles sont clairement représentées.

2.1. L'exercice du contrôle exécutif dans l'élaboration de la représentation de la relation source

Si l'importance de la connaissance des relations a été soulignée dans les travaux antérieurs, celles-ci ne sont toutefois pas suffisantes lorsque le traitement de la source n'amorce pas d'emblée la représentation d'une relation particulière. Dans ce cas, une élaboration contrôlée de la représentation devient nécessaire. Sur un plan exécutif, la difficulté à construire cette représentation dépend en particulier du nombre d'éléments non pertinents devant être ignorés. Hoyer, Rebok, et Sved (1979) ont établi que ce nombre accroît le coût de résistance à l'interférence de ces informations. Viskontas et al. (2004) ont obtenu un effet similaire avec des participants âgés à qui l'on demandait de vérifier si des paires présentées deux à deux étaient analogues sur un certain nombre de dimensions. Cet effet d'interférence, particulièrement marqué chez les personnes âgées, peut aussi s'observer chez des

adultes jeunes dès lors que les dimensions pertinentes sur lesquelles doit s'opérer la vérification de l'analogie ne sont indiquées qu'après l'encodage de la première paire (Cho, Holyoak, & Cannon, 2007). Dans cette condition en effet, les participants n'ont pas la possibilité d'ignorer les dimensions non pertinentes avant l'encodage et l'effet d'interférence créé par ces dimensions est délétère. Chez les enfants, Thibaut, French, et Vezneva (2010a) ont ajouté du « bruit perceptif », i.e., des textures aléatoires, aux stimuli dans une tâche d'analogie de type A:B :: C:D. Cet élément non pertinent rendait l'extraction de la relation qui donnait sens à l'analogie, plus difficile. Les résultats ont montré un effet d'interaction entre la présence du bruit et l'âge des enfants : les enfants les plus jeunes (6 et 8 ans) ont vu leur performance davantage affectée par cet effet de texture, les plus âgés (14 ans) semblant rapidement isoler les seules dimensions pertinentes pour l'analogie. Ensemble, ces études révèlent l'importance des processus inhibiteurs lors de la formation d'une représentation de la relation source.

Outre la fonction d'inhibition, la flexibilité est parfois requise lors de la construction d'une représentation pertinente de la structure relationnelle source. En effet, le traitement de la tâche ne se fait pas toujours de manière sérielle mais plutôt par des allers-retours entre traitement des situations source et cible (Ripoll, 1992). Si la première représentation de la relation source envisagée peut être tout à fait adaptée, elle nécessite parfois d'être ajustée, voire complètement révisée. Par exemple, dans une analogie A:B :: C:D, l'analyse de la paire A:B peut révéler rapidement une relation saillante qui n'est pas utilisable pour construire une relation entre C et D. Dans ce cas, il est probable que la construction de l'analogie nécessitera un va-et-vient entre la paire A:B et la paire « C: ? » qui permettra de donner un sens global à la situation proposée. Si la paire A:B est constituée des termes « chien » et « chiot », la première relation qui vient à l'esprit sera souvent « enfant de ». Cependant, si le terme C est horloge et les solutions proposées sont « montre » (D); « ballon » (E); « train » (F), alors la première relation extraite entre A et B semble difficilement utilisable. On est obligé de trouver une autre relation entre A et B qui permette d'intégrer *horloge*. Ce pourrait être la relation « plus grand que » qui permet de construire une analogie où C et D sont *horloge* et *montre* (voir French 2008, pour une discussion). Glady, French, et Thibaut (soumis) ont directement testé cette idée de révision ou de re-représentation sur des enfants de 5-6 ans avec des analogies de type A:B :: C:D. Dans cette

expérience, les enfants voyaient d'abord la paire A:B seule et devaient verbaliser la relation unissant les deux termes, puis voyaient C et l'ensemble des solutions. Les auteurs ont comparé deux conditions. Dans la première (appelée « restructuration »), la même paire A:B pouvait figurer deux relations : une relation sémantique (par exemple les termes *chemise* et *valise* liés par la relation « aller dans ») et une relation d'identité de couleur (A et B étaient rouges). L'identité de couleur était saillante mais n'était pas pertinente pour interpréter l'analogie car aucun stimulus de l'ensemble des solutions proposées ne possédait la même couleur que C. Dans la seconde condition (« contrôle »), les paires A:B étaient conçues pour n'exprimer qu'une seule relation, sémantique dans ce cas (i.e, la relation « aller dans » pour *chemise* et *valise*). Les résultats ont montré que les performances dans la condition restructuration étaient inférieures à celles de la condition contrôle. Dans la condition restructuration, la plupart des participants interprétaient la paire A:B en termes de la relation « même couleur ». On peut alors interpréter la différence entre les deux conditions comme reflétant un coût de flexibilité cognitive. En effet, dans la condition restructuration, sélectionner la réponse correcte nécessitait de réviser la première représentation de la paire A :B pour envisager une nouvelle relation applicable dans l'ensemble de solutions.

Il est intéressant de noter que chez les jeunes enfants, cette difficulté de révision des représentations se manifeste également lors de la résolution d'analogies successives. Minier et Blaye (2012a) ont proposé à des enfants de 4 et 5 ans des analogies de type A:B :: C:D portant sur des relations « même forme » ou « même couleur ». Les performances analogiques des enfants étaient moins bonnes lorsque la relation à transférer analogiquement différait de celle pertinente à l'essai précédent. Ces résultats soulignent la difficulté des enfants à se décentrer d'une relation précédemment pertinente pour en envisager une nouvelle et pointent la nécessité d'un contrôle flexible pour la résolution des analogies.

2.2. Effet de la représentation de la relation source sur le contrôle exécutif de la résolution de l'analogie

Contrairement à ce que laissent supposer les thèses développées par Gentner et Goswami, la connaissance des relations ne doit pas être considérée en tout ou rien mais doit s'évaluer en termes gradués reflétant la force des représentations (Morton & Munakata, 2002 ; Munakata & Yerys, 2001). Une telle proposition offre un cadre interprétatif permettant de rendre compte de robustes phénomènes de dissociations entre connaissances et actions observées dans la littérature développementales (e.g. Cepeda & Munakata, 2007 ; Yerys & Munakata, 2006). Une représentation peut voir sa force varier en fonction des contextes, de l'expertise ou du développement. Lorsqu'il s'agit de relations entre objets, les représentations d'objets peuvent être plus ou moins fortement associées en fonction de l'expérience. Ainsi, deux représentations fortement associées auront tendance à être automatiquement co-activées alors que deux représentations faiblement associées exigeront plus de contrôle pour être manipulées comme une structure relationnelle source (e.g., chien-niche vs chien-arbre). De plus, la représentation d'une relation peut permettre une bonne performance dans une situation-problème peu ou pas conflictuelle mais peut s'avérer insuffisante si la situation implique de dépasser un conflit entre plusieurs représentations (Cepeda & Munakata, 2007). L'influence de cette hiérarchie des forces d'associations des représentations dans le contrôle d'un raisonnement a été établie dans le domaine de la catégorisation. Par exemple, Scheuner, Bonthoux, Cannard, & Blaye (2004) ont montré que la tendance des jeunes enfants à privilégier un mode de catégorisation thématique était modulée par la force d'association entre objets. Ainsi, dans une tâche d'appariement d'images en choix forcé, les associés taxonomiques pouvaient se trouver plus facilement sélectionnés que les associés thématiques si la force d'association des premiers dépassait celle des seconds. On peut envisager que lors du RA, la force relative des relations pertinentes et distractrices crée un conflit d'autant plus difficile à dépasser que le rapport de forces est au bénéfice des relations distractrices.

Une autre façon d'évaluer la gradation en termes de coût de contrôle, selon la force de la représentation de la situation source est celle adoptée dans l'étude de Thibaut et al. (2010b). Ces auteurs testent l'effet de la force d'association (faible, élevée) des termes de la source sur la recherche contrôlée de son analogue en faisant varier le nombre de distracteurs de l'ensemble de solutions (1 ou 3) sur les performances analogiques d'enfants de 4 et 5 ans. Leurs résultats révèlent l'effet du nombre

de distracteur(s), uniquement lorsque les relations pertinentes sont faibles. Autrement dit, une force élevée de la représentation des relations pertinentes permet d'exercer un contrôle plus efficace lors de la recherche de la solution et donc d'ignorer plus facilement les distracteurs, quel que soit leur nombre.

Un élément important dans l'augmentation de la force des représentations pertinentes est sans doute le degré d'explicitation de celles-ci. Gentner et ses collaborateurs ont montré que les enfants ont de meilleures performances de transfert analogique lorsqu'ils sont entraînés à étiqueter verbalement la relation source (e.g. Kotovsky & Gentner, 1996; Loewenstein & Gentner, 2005; Rattermann & Gentner, 1998a ; Rattermann & Gentner, 1998b). Selon ces auteurs, un label commun invite à une comparaison plus profonde des stimulus qui portent le même label, et donc, à aller au-delà des similitudes de surface existantes entre les items (Christie & Gentner, 2010; Gentner & Namy, 1999; Kotovsky & Gentner, 1996). Il s'agit bien là d'une interprétation suggérant qu'une explicitation verbale de la représentation de la situation source favorise une amélioration du contrôle sur la résolution de l'analogie. En effet, l'explicitation de la relation source peut contribuer à son maintien en mémoire de travail et ainsi la rendre plus facilement accessible tout au long du traitement.

Son, Smith, Goldstone, & Leslie (2012) envisagent une interprétation complémentaire de l'explicitation verbale les conduisant à graduer différents niveaux d'explicitation. Selon ces auteurs, la signification des mots active des schémas de structures relationnelles construits par l'expérience qui permettent aux enfants d'effectuer des liens entre situations source et cible. Dès lors, pour que l'étiquette verbale soit bénéfique au raisonnement, elle doit activer des schémas d'un niveau d'abstraction optimal (« *optimal vagueness hypothesis* »). Autrement dit, le schéma activé doit en dire assez sur la structure relationnelle pour pouvoir guider une inférence mais sans trop de spécificités pour qu'il puisse être appliqué à une situation nouvelle. Des enfants de 4-5 ans testés sur le transfert analogique de relations telle que la symétrie (deux objets identiques entourent un troisième objet) obtiennent de meilleures performances quand ils utilisent un label évoquant un schéma (« Partage ») plutôt qu'un non-mot (« Koli ») ou un mot iconique (une série de syllabes congruentes avec la structure relationnelle testée, « Ko-Li-Ko »). D'après les auteurs, le mot iconique est trop abstrait pour

que les enfants lui donnent du sens et l'utilisent efficacement, d'où l'idée d'une étiquette d'une imprécision optimale.

Ces différents travaux ont montré que l'explicitation de la relation pertinente par un label relationnel augmentait les performances analogiques. Cependant, s'ils suggèrent que ce bénéfice pourrait résulter d'une amélioration du contrôle exercé sur la résolution de l'analogie, ils ne le testent pas directement. Des études récentes ont montré que l'explicitation verbale, comme symbolique (l'image d'un pinceau pour étiqueter la relation « même couleur » ou d'un crayon pour la relation « même forme », Minier & Blaye, 2012a) de la relation pertinente modérait le coût exécutif du raisonnement chez des enfants de 4- 5 ans. Cette étude montre qu'une explicitation de la relation source permet de mieux résister à l'interférence créée par l'introduction d'un distracteur dans l'ensemble de solutions. De plus, le bénéfice de l'utilisation d'un symbole imagé, montre que ce n'est pas la verbalisation, en tant que telle, qui est importante mais bien l'explicitation de la nature de la relation. Ainsi, dans un contexte de ressources exécutives limitées, l'augmentation de l'efficacité du contrôle - meilleure résistance aux distracteurs - lors d'une meilleure explicitation de la représentation de la relation source, conforte l'hypothèse d'une étroite interaction entre représentation et contrôle dans le RA.

Enfin, comme pour la relation source, l'élaboration de la représentation de la cible engendre aussi un coût de contrôle. Minier et Blaye (2012b) ont mesuré le RA d'enfants de 4 et 5 ans en contrastant deux contextes d'évaluation parmi les plus souvent utilisés : une épreuve $A:B :: C:D$ et une épreuve d'appariement relationnel. Contrairement à l'épreuve $A:B :: C:D$, l'appariement relationnel implique de choisir entre des paires déjà constituées. Ainsi, elle devrait entraîner un coût exécutif plus faible que celui de l'épreuve $A:B :: C:D$ car elle supprime la nécessité de construire une représentation mentale des potentielles relations cibles. Cet aspect est d'autant plus important que cette représentation doit être engagée dans un processus de comparaison avec la paire source. Comme attendu, les enfants ont obtenu de meilleures performances en tâche d'appariement relationnel confirmant ainsi l'étayage exécutif que constituent les paires déjà formées pour le transfert analogique.

Les travaux présentés ci-dessus ont montré le rôle du contrôle exécutif dans le RA chez l'enfant. Ils ont également souligné l'importance des représentations - et du langage comme support à l'élaboration de ces représentations - dans la mise en œuvre d'un contrôle efficient. Ainsi, les rôles respectifs du langage et de la qualité des processus de contrôle sont difficilement dissociables chez l'humain. L'étude des primates non humains permet de corroborer le rôle du contrôle exécutif dans le RA et d'étudier son implication en dehors du langage.

3. Etudes chez le primate non-humain

Par leur proximité phylogénétique avec l'homme, les primates non-humains ont constitué depuis plus de trente ans des modèles d'étude potentiellement intéressants pour comprendre le raisonnement par analogie chez l'enfant. Des travaux récents démontrent que malgré l'absence de langage, le primate non humain est capable de raisonner par analogie sur des relations perceptives et, de surcroît, soulignent que cette compétence est corrélée avec l'efficacité de leurs fonctions exécutives. Nous détaillons, dans un premier temps, certains aspects du contrôle exécutif des primates non humains, et notamment concernant les fonctions supposées jouer un rôle dans le RA chez l'homme. Dans un second temps, nous détaillons les différentes compétences d'analogie mises en évidence chez les primates non humains. Nous finissons par une présentation d'un jeu de corrélations entre efficacité des fonctions exécutives et capacités de RA chez un groupe de babouins.

3.1. Fonctions exécutives chez le primate non-humain

Les primates non-humains possèdent un contrôle exécutif efficace (Lauwereyns, Koizumi, Sakagami, Hikosaka, Kobayashi, & Tsutsui, 2000; Washburn, 1994) dont le siège est situé, comme chez l'homme, dans le cortex préfrontal (Sakagami, Tsutsui, Lauwereyns, Koizumi, Kobayashi, & Hikosaka, 2001 ; Roberts & Wallis, 2000). L'étude des fonctions exécutives chez les primates non

humains montre qu'ils disposent de la plupart des fonctions *a priori* nécessaires au raisonnement par analogie.

Chez l'homme, la taille de l'empan de la mémoire à court terme serait déterminante dans les capacités de raisonnement (Kane & Engle, 2002). Dans un travail récent, Fagot et De Lillo (2011) ont mesuré la capacité de stockage en mémoire à court terme chez le babouin en utilisant le test des blocs de Corsi (Corsi, 1972). L'expérimentateur affichait de trois à six formes identiques sur l'écran d'ordinateur, et le babouin devait par la suite sélectionner ces formes en répliquant leur ordre d'apparition dans la séquence d'affichage. Les babouins ont réussi à reproduire des séquences composées de quatre à cinq items. Puisque l'encodage de deux relations peut impliquer le stockage de quatre items, ces animaux semblent donc disposer de suffisamment de ressources en mémoire à court terme pour pouvoir encoder les relations du domaine source et du domaine cible, et donc potentiellement pour résoudre des problèmes d'analogie.

Toutefois, être capable de mémoriser un nombre important d'items en mémoire ne suffit pas pour résoudre la tâche d'appariement relationnel. Comme nous l'avons vu chez l'enfant, le maintien de la relation source en mémoire pour guider le traitement de la paire cible est critique. Rey, Perruchet et Fagot (2012) ont récemment démontré que les babouins peuvent maintenir un but en mémoire de travail alors qu'ils traitent d'autres items. Cette étude s'est déroulée en deux temps. Dans une première phase, des paires de stimuli étaient présentées à l'écran et le babouin devait toucher les éléments de chaque paire dans un ordre précis. Les paires mémorisées correspondaient donc à des séquences ordonnées que l'on peut noter A1-A2, B1-B2... N1-N2 pour les paires A à N, respectivement. La seconde phase consistait à présenter simultanément le premier élément de deux paires distinctes (par exemple les éléments A1 et B1), puis les compléments de chaque paire associés à des distracteurs (par exemple A2, B2 et C2).

L'analyse montre qu'un nombre important de séquences produites avait une structure emboîtée de type A1-B1-B2-A2, et donc que les babouins peuvent activement maintenir en mémoire

le complément A2 de la paire A1-A2, alors qu'ils traitaient la paire B1-B2. Le babouin fait donc ici preuve d'une compétence de mise à jour du but en mémoire de travail.

Deux autres fonctions ont été identifiées comme pouvant jouer un rôle dans le RA chez l'enfant : Il s'agit de la flexibilité cognitive et de l'inhibition. La flexibilité cognitive du babouin a été récemment testée grâce à une adaptation de la tâche de Wisconsin Card Sorting Test (WCST, Berg, 1948 ; Bonté, Flemming et Fagot, 2011, cf. Figure 3.A). Dans cette tâche, les animaux devaient dans un premier temps apprendre à sélectionner des stimuli caractérisés par une valeur de dimension particulière (par exemple la couleur verte, expérience 1). Après avoir appris la dimension associée à la récompense, le programme informatique changeait brusquement la règle de discrimination, par exemple en demandant de sélectionner les items en forme de triangle. Ce travail a montré une adaptation rapide aux changements soudains de la règle de discrimination. Une autre étude a également confirmé de très bonnes capacités d'inhibition chez le babouin dans une tâche de recherche visuelle (Fagot, Bonté & Hopkins, 2011, Expérience 1). Dans cette tâche informatisée, le babouin devait sélectionner une cible parmi un nombre variable de distracteurs (cf. Figure 3. B). La bonne performance des singes dans cette tâche (voir ci-dessous) montre leur capacité à inhiber leurs réponses aux distracteurs lors de la sélection de la cible.

En résumé, le babouin fait preuve d'une flexibilité cognitive et d'un contrôle inhibiteur lui permettant de traiter en parallèle plusieurs objets en maintenant activement un but en mémoire de travail. Si ces capacités semblent nécessaires à l'émergence des processus d'analogie, qu'en est-il de la performance des babouins dans des tâches impliquant ce type de raisonnement?

< Insérer Figure 3 >

3.2. Raisonnement par analogie chez le primate non-humain.

La première étude sur le raisonnement par analogie chez le primate non humain a été menée chez Sarah, une femelle chimpanzé qui avait au préalable appris la signification de symboles en

plastique (Gilliam, Premack & Woodruff, 1981). La tâche proposée était de type A:B :: C:D. Dans la pratique, les auteurs présentaient à Sarah trois formes géométriques sur un plateau. Deux de ces formes correspondaient à la paire source A:B, la troisième forme à

« C ». Dans cette étude, Sarah s'est montrée capable de choisir dans un lot de formes celle qui complétait la paire cible, de telle manière que les paires sources et cibles entretiennent simultanément les mêmes relations de taille, de couleur et de texture. Selon Premack (1983), l'excellente performance de Sarah dans cette tâche s'expliquerait par son entraînement préalable au « langage ». Cette hypothèse a toutefois été remise en cause par une série de travaux montrant que des singes n'ayant pas suivi d'entraînement préalable au « langage » étaient capables de résoudre certaines tâches d'analogie.

Ainsi, Thompson, Oden et Boysen (1997) ont démontré que des chimpanzés qui ont seulement appris à utiliser deux symboles pour labelliser les relations d'identité et de différence pouvaient résoudre une tâche d'appariement relationnel à un même niveau de performance que Sarah. Selon ces auteurs, ces deux symboles auraient permis de labelliser les relations à appairer. Ces travaux suggèrent que le rôle du langage dans le raisonnement par analogie soit de conférer au raisonneur des moyens de symbolisation des relations. Cette théorie est en accord avec l'hypothèse émise chez l'homme sur l'importance de la connaissance préalable des relations à traiter (Gentner, 1988 ; Goswami & Brown, 1989).

Cependant, de récents travaux suggèrent que la connaissance des relations ne soit pas nécessairement liée à la possession de symboles pour labelliser ces relations, au moins pour des relations simples. En effet, des équipes ont récemment mis en évidence chez le singe l'émergence de processus cognitifs leur permettant de comparer des relations d'identité et de différence sans acquisition préalable de labels pour décrire ces relations (Fagot & Thompson, 2011 ; Flemming, Thompson, & Fagot, 2013 ; Maugard, Marzouki, & Fagot, 2013 ; Truppa, Piano Mortari, Garofoli, Privitera & Visalberghi, 2011). Fagot & Thompson (2011) ont ainsi montré que des babouins pouvaient appairer des paires de formes en considérant les relations d'identité ou de différence que ces paires représentent. Dans un protocole d'appariement relationnel, une paire de formes géométriques

source était présentée, par exemple deux carrés pour une relation d'identité. Après une phase d'exploration de la paire source, deux paires cibles au choix apparaissaient, par exemple deux ronds (relation d'identité) ou une croix et un carré (relation de différence). Les babouins devaient choisir la paire cible qui représentait la même relation que la paire source, ici les deux ronds, en négligeant le fait que la paire à éviter partageait un attribut (un carré) avec la paire source (cf. Figure 4.A.). Parmi les sujets testés, 6 ont réussi à atteindre des performances supérieures à 80% dans cette tâche démontrant une aptitude à traiter prioritairement les informations relationnelles, au détriment des informations liées aux attributs. Cependant, les résultats de l'ensemble du groupe présentent de fortes variabilités interindividuelles, comme en témoigne la Figure 4.B. qui montre les performances de 16 sujets testés. Cette variabilité a été retrouvée dans d'autres études. Une étude menée sur le singe capucin (Truppa et al., 2011) montre qu'un seul singe sur les cinq testés s'est avéré capable de résoudre un problème d'appariement relationnel impliquant des paires de stimuli identiques ou différents. Cette variabilité interindividuelle se retrouve chez des babouins testés sur une version complexifiée de la tâche d'appariement relationnel (Fagot & Maugard, 2013). Dans cette expérience, les babouins devaient garder en mémoire la paire source dans la mesure où elle figurait deux relations (par exemple, identité de formes et différence de couleurs) et que l'une d'elles seulement trouvait son analogue dans l'ensemble des solutions (cf., concept de re-représentation décrit chez l'enfant). Après un entraînement de plusieurs milliers d'essais, seuls quelques babouins se sont montrés capables de résoudre cette tâche complexe. Nous verrons ci-dessous que la variabilité observée dans la tâche d'appariement relationnel est fortement liée à l'âge et pourrait s'expliquer par la variabilité interindividuelle dans l'efficacité du contrôle exécutif.

< Insérer Figure 4 >

3.3 Corrélations entre fonctions exécutives et raisonnement par analogie

Les travaux conduits par l'équipe de Joël Fagot à la plateforme Cognition Comparée du Laboratoire de Psychologie Cognitive à Marseille ont permis de mesurer à la fois le contrôle exécutif

et les performances dans une tâche d'appariement relationnel d'un groupe de 16 babouins âgés de 3,7 à 15,3 ans.

L'analyse des corrélations entre ces différentes variables montre tout d'abord que l'efficacité du contrôle exécutif (i.e., la flexibilité cognitive et l'inhibition) est négativement corrélée à l'âge des sujets (i.e., tâche de flexibilité cognitive : $r = -0.74$, $p < .05$; tâche d'inhibition : $r = -0.80$, $p < .05$). Ces résultats sont concordants avec l'ensemble des travaux conduits chez les primates humains et non humains montrant que l'efficacité du contrôle exécutif varie en fonction de l'âge (humains : Zelazo, Craik et Booth, 2004 ; primates non humains : Moore, Killiany, Herndon, Rosene & Moss, 2006 ; Picq, 2007 ; Weed, Bryant & Perry, 2008). De plus, ils s'accordent avec les études conduites chez le babouin qui décrivent une maturation des fonctions exécutives jusqu'à 6-8 ans puis une diminution progressive de leur efficacité (Bonté, Flemming et Fagot, 2011).

L'analyse des performances d'appariement relationnel en fonction de l'âge révèle également une corrélation négative entre ces deux variables ($r = -0.80$, $p < .05$), en concordance avec les résultats issus de la littérature humaine montrant une diminution des capacités de RA chez les personnes âgées (Viskontas et al., 2004).

Ces premières analyses montrent que le contrôle exécutif et les capacités d'appariement relationnel des babouins sont tous deux corrélés négativement à l'âge, nous conduisant à formuler l'hypothèse que l'efficacité du contrôle exécutif et les capacités RA soient liés.

L'analyse des corrélations entre les performances sur la tâche d'appariement relationnel (Fagot & Thompson, 2011) avec celles obtenues sur les tâches de flexibilité cognitive (Bonté, Flemming et Fagot, 2011, Expérience 1) et d'inhibition (Fagot, Hopkins & Bonté, 2011, Expérience 1) révèle que ces variables sont positivement corrélées ($r = 0.55$, $p < .05$, pour l'inhibition ; $r = 0.55$, $p < .05$, pour la flexibilité, cf. figure 5.A et 5.B).

Ainsi, dans l'échantillon de population testé, les individus les plus jeunes présenteraient un contrôle exécutif efficace ainsi que de bonnes performances en appariement relationnel. A l'inverse,

les individus les plus âgés disposeraient d'un contrôle exécutif moins efficace et auraient plus de difficulté à résoudre la tâche d'appariement relationnel.

Pour conclure, l'évolution des capacités de RA chez le singe au cours de la vie pourrait être expliquée par les variations dans l'efficacité du contrôle exécutif avec l'âge.

Conclusions sur le rôle des fonctions exécutives dans le raisonnement par analogie

Le rôle du contrôle exécutif dans le raisonnement est un sujet d'investigation en plein essor (e.g. Handley, Capon, Beveridge, Dennis, & Evans, 2004 ; Moutier, 1997 ; Moutier, Plagne-Cayeux, Melot, & Houdé, 2006 ; Steegen & De Neys, 2012). Jusqu'alors, les travaux sur le RA ont majoritairement attribué son émergence au développement des connaissances relationnelles. Les études présentées ici sont les premières à mettre en évidence l'importance du contrôle exécutif dans ce type de raisonnement.

Chez l'homme, les travaux conduits dans ce domaine reposent le plus souvent sur une approche expérimentale consistant à graduer le coût exécutif de la tâche d'analogie et à en observer les effets sur le raisonnement exprimé. Les résultats montrent que les performances ne dépendent pas seulement des connaissances relationnelles mais aussi du contexte de mise en œuvre de l'analogie. Ainsi, un enfant ayant une certaine représentation de la relation peut réussir une tâche impliquant un faible coût exécutif mais échouer sur une autre qui exige plus de contrôle. De rares études corrélationnelles (Thibaut et al., 2011, Chuderska & Chuderski, 2009) ont permis de préciser l'implication spécifique de chacune des fonctions de contrôle, elles montrent que les fonctions d'inhibition, de flexibilité et de mise à jour en mémoire de travail sont toutes positivement corrélées aux performances analogiques. Plus récemment, l'étude longitudinale de Richland et Burchinal (2013) suggère même que l'efficacité des fonctions exécutives chez des enfants à 4 ans prédit la qualité de leur RA à 15 ans.

Les données corrélationnelles obtenues lors de l'étude du primate non humain corroborent les observations chez l'humain en montrant qu'un raisonnement de type analogique est possible chez cette espèce dépourvue de langage mais capable d'exercer un contrôle efficient sur un matériel semblable à celui proposé en tâche d'analogie. Bien que ne disposant probablement pas d'outils d'explicitation aussi efficace que le langage, les primates non humains développent néanmoins une certaine connaissance de la tâche et des relations testées (i.e. identité et différence) à travers le grand nombre d'essais qu'ils ont réalisés (en moyenne 24 000 essais pour atteindre un critère de réussite de 80% de bonnes réponses dans l'étude de Fagot et Thompson, 2011). Il est probable que les singes apprennent à ignorer les attributs perceptifs pour se focaliser sur les relations grâce à ce long entraînement par essais-erreurs. En effet, si un singe commence par traiter les attributs perceptifs et à appairer les items sur ce critère, il n'obtient pas de récompense. Au fur et à mesure des essais et des renforcements, il apprend donc à négliger les attributs perceptifs et à déplacer son focus attentionnel jusqu'à traiter les caractéristiques relationnelles pour être enfin renforcé positivement. Par ailleurs, c'est en rencontrant divers exemples d'une même relation que les participants peuvent extraire les caractéristiques communes à l'ensemble de ces situations, à savoir la relation. Au fil des expériences, le *raisonneur* (primate humain ou non humain) peut extraire un noyau relationnel qu'il devient capable de reconnaître dans une nouvelle situation, en dépit des différences avec les situations rencontrées auparavant (cf. notion d'alignement progressif, Kotovsky & Gentner, 1996). L'approche originale adoptée ici a eu pour objet de spécifier les processus cognitifs qui sous-tendent l'appariement relationnel au cœur du RA. Les travaux réalisés chez les primates non humains et humains convergent sur l'intervention des trois principales fonctions de contrôle : inhibition, flexibilité cognitive et mise à jour des informations en mémoire de travail.

Chez l'humain, l'explicitation des représentations de la structure relationnelle source favorise un meilleur contrôle lors de la résolution de l'analogie. En retour, un contrôle efficient est requis pour conduire à une focalisation sur les seules informations pertinentes dans la situation source. Des va-et-vient entre la situation source et le contexte cible peuvent ainsi être nécessaires pour un ajustement flexible des représentations. Ainsi, les approches en termes de connaissances et de contrôle ne doivent

pas être opposées, mais au contraire articulées dans l'objectif d'une meilleure compréhension des processus sous-jacents au RA. Un modèle computationnel élaboré par Morrison, Doumas et Richland (2011) a d'ailleurs montré que l'augmentation des capacités d'inhibition était le meilleur prédicteur des différences développementales en RA, alors qu'une modification dans le système de représentation était ce qui expliquait le mieux les différences entre enfants du même âge, issus de cultures différentes.

Bien que les travaux empiriques restent encore rares, la psychologie développementale et l'approche comparative du RA disposent maintenant de la boîte à outils conceptuelle et méthodologique permettant d'étudier plus avant le rôle du développement des capacités de contrôle dans le développement même des compétences à raisonner par analogie. A ce titre, la prise en considération des connaissances, non plus dans une perspective dichotomique – présence/absence- mais comme correspondant à des représentations graduées, apparaît comme prometteuse.

Références

- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. *The psychology of learning and motivation*, 8, 47-89.
- Berg, E.A. (1948). A simple objective test for measuring flexibility in thinking. *Journal of General Psychology*, 39, 15–22.
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A developmental perspective on executive function. *Child Development*, 81(6), 1641–1660
- Bonté, E., Flemming, T., & Fagot, J. (2011). Executive control of perceptual features and abstract relations by baboons (*Papio papio*). *Behavioural Brain Research*, 222, 176-182.
- Blaye, A., & Chevalier, N. (2011). The role of goal representation in preschoolers' flexibility and inhibition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108 (3), 469-483.
- Cayol, D., Bastien-Toniazzo, M., & Blaye, A. (1997). Résolution de problème par analogie par des enfants de grande section de maternelle. *L'année psychologique*, 97(3), 409–432.
- Cepeda, M. L., & Munakata, Y. (2007). Why do children persevere when they seem to know better: Graded working memory, or directed inhibition? *Psychonomic Bulletin and Review*, 14(6), 1058-1065
- Chen, Z., Sanchez, R. P., & Campbell, T. (1997). From beyond to within their grasp: The rudiments of analogical problem solving in 10-and 13-month-olds. *Developmental Psychology*, 33(5), 790.
- Chevalier, N. (2010). Les fonctions exécutives chez l'enfant : concepts et développement [Executive functions in children: Concepts and development]. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 51 (3), 149-163.
- Chevalier, N. & Blaye, A. (2006). Le développement de la flexibilité cognitive chez l'enfant préscolaire: enjeux théoriques. *L'année psychologique*, 106, 569-60

- Cho, S., Holyoak, K. J., & Cannon, T. D. (2007). Analogical reasoning in working memory: Resources shared among relational integration, interference resolution, and maintenance. *Memory & cognition*, 35(6), 1445–1455.
- Christie, S., & Gentner, D. (2010). Where Hypotheses Come From: Learning New Relations by Structural Alignment. *Journal of Cognition and Development*, 11(3), 356–373.
- Chuderska, A., & Chuderski, A. (2009). Executive control in analogical reasoning: Beyond interference resolution. *Proceedings of the 31st Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Amsterdam: Cognitive Science Society.
- Corsi, P. M. (1972). Human memory and the medial temporal region of the brain. Dissertation Abstracts International, 34(02), 891B (University microfilms No. AA105-77717).
- Cragg, L., & Chevalier, N. (2012). The processes underlying flexibility in childhood. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65,2, 209-232..
- Cragg, L., & Nation, K. (2008). Go or no-go? Developmental improvements in the efficiency of response inhibition in mid-childhood. *Developmental Science*, 11, 819-827.
- Crisafi, M. A., & Brown, A. L. (1986). Analogical transfer in very young children: Combining two separately learned solutions to reach a goal. *Child Development* 57, 953-968.
- Dunbar, K., & Blanchett, I. (2001). The in vivo /in vitro approach to cognition: the case of analogy, *Trends in Cognitive Science*, 5, 334-339
- Duncan, J., Emslie, H., Williams, P., Johnson, R., & Freer, C. (1996). Intelligence and the frontal lobe: The organization of goal-directed behavior. *Cognitive Psychology*, 30, 257-303.
- Fagot, J., Bonté, E., & Hopkins, W. D. (2011). Age-dependant behavioral strategies in a visual search task in baboons (*Papio papio*) and their relation to inhibitory control. *Journal of Comparative Psychology*

- Fagot, J., & De Lillo, C. (2011). A comparative study of working memory : Immediate serial spatial recall in baboons (*Papio papio*) and humans. *Neuropsychologia*, 49, 3870-3880.
- Fagot, J., & Maugard, A. (2013). Analogical reasoning in baboons (*Papio papio*): Flexible reencoding of the source relation depending on the target relation. *Learning & Behavior*, 1-9. doi:10.3758/s13420-012-0101-7
- Fagot, J., & Thompson, R. K. R. (2011). Generalized Relational Matching by Guinea baboons (*Papio papio*) in Two-by-Two-Item Analogy Problems. *Psychological Science*, 22, 1304– 1309.
- Flemming, T., Thompson, R. R., & Fagot, J. (2013). Baboons, like humans, solve analogy by categorical abstraction of relations. *Animal cognition*, 1-6. doi:10.1007/s10071-013-0596-0
- French, B. (2008). Relational priming is to analogy-making as one-ball juggling is to seven-ball juggling. *Behavioral and Brain Sciences*, 31 , 386-387.
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134, 31–60.
- Gentner, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7(2), 155–170.
- Gentner, D. (1988). Metaphor as structure mapping: The relational shift. *Child Development*, 47–59.
- Gentner, D. (2003). Why we're so smart. In D. Gentner and S. Goldin-Meadow (Eds.), *Language in mind: Advances in the study of language and thought*. Cambridge, MA: MIT Press
- Gentner, D., Holyoak, K. J., & Kokinov, B. N. (2001). *The analogical mind: Perspectives from cognitive science*. Cambridge, MA: Bradford
- Gentner, D., & Namy, L. L. (1999). Comparison in the development of categories. *Cognitive Development*, 14(4), 487–513.
- Gentner, D., & Rattermann, M. J. (1991). Language and the career of similarity. In S. A. Gelman & J.

- P. Brynes (Eds.), *Perspectives on Language and Thought: Interrelations in Development*, 225-277.
- Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: Performance of children 3-7 years old on a stroop-like day-night test. *Cognition*, 53, 129-153
- Gillan, D. J., Premack, D., & Woodruff, G. (1981). Reasoning in the chimpanzee: I. Analogical reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 7, 1-17.
- Glady, Y. French, R.M., & Thibaut, J.P. (soumis) Helping children overcome strategic deficits in the A:B::C:? task: a contribution to understanding analogical reasoning development
- Goswami, U. (1992). *Analogical reasoning in children*. Hillsdale, NJ: Erlbaum
- Goswami, U., & Brown, A. L. (1989). Melting chocolate and melting snowmen: Analogical reasoning and causal relations. *Cognition*, 35(1), 69-95.
- Goswami, U., & Brown, A. L. (1990). Higher-order structure and relational reasoning: Contrasting analogical and thematic relations. *Cognition*, 36(3), 207-226.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (1998). Processing capacity defined by relational complexity: Implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, 21(06), 803-831.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (2010). Relational knowledge: the foundation of higher cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(11), 497-505.
- Handley, S. J., Capon, A. A., Beveridge, M. M., Dennis, I. I., & Evans, J. T. (2004). Working memory, inhibitory control and the development of children's reasoning. *Thinking & Reasoning*, 10(2), 175-195.
- Harlow, J. M. (1868). Recovery after Severe Injury to the Head. *Bulletin of the Massachusetts Medical Society*. Reprinted in *History of Psychiatry*, 4(14), 274-281 (1993)

- Hoyer, W., Rebok, G. & Sved, S. (1979). Effects of varying irrelevant information on adult age differences in problem Solving. *Journal of gerontology*, 34, 553-560
- Inhelder, & Piaget. (1955). De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent. Paris : Presses Universitaires de France.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: An individual-differences perspective. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 637-671.
- Kotovsky, L., & Gentner, D. (1996). Comparison and categorization in the development of relational similarity. *Child Development*, 67(6), 2797–2822.
- Lauwereyns, J., Koizumi, M., Sakagami, M., Hikosaka, O., Kobayashi, S., & Tsutsui, K. (2000). Interference from irrelevant features on visual discrimination by macaques (*Macaca fuscata*): A behavioral analogue of the human Stroop effect. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 26, 352-357.
- Loewenstein, J., & Gentner, D. (2005). Relational language and the development of relational mapping. *Cognitive Psychology*, 50(4), 315–353.
- Maestriperi, D. (2005). *Primate psychology*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Maintenant, C., & Blaye, A. (2008). Développement de la flexibilité catégorielle de 3 à 8 ans : Rôle des aspects conceptuels. *L'Année Psychologique*, 108, 659-698.
- Marcovitch, S., Boseovski, J. J. and Knapp, R. J. (2007), Use it or lose it: examining preschoolers' difficulty in maintaining and executing a goal. *Developmental Science*, 10: 559–564.
- Markman, A. B., & Gentner, D. (1993). Structural alignment during similarity comparisons. *Cognitive Psychology*, 25(04).
- Maugard, A., Marzouki, Y. & Fagot, J. (in press). Contribution of Working Memory Processes to Relational Matching-to-Sample Performance in Baboons (*Papio papio*). *Journal of Comparative*

Psychology

- Minier, L., & Blaye, A. (2012a). Analogical reasoning in preschoolers: Can an explicit representation enhance executive control? Poster presented to the Development of Executive Functions workshop, Utrecht, Netherlands (April 18-19)
- Minier, L., & Blaye, A. (2012b). Analogical reasoning in preschoolers: A matter of both relational knowledge and executive control. Poster presented to the International Conference on Thinking, London, England (July 4-6)
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., & Howerter, A. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. (C. Psychology, Ed.) *Cognitive Psychology*, *41*(1), 49–100.
- Moore TL, Killiany RJ, Herndon JG, Rosene DL, Moss MB. Executive system dysfunction occurs as early as middle-age in the rhesus monkey. *Neurobiol Aging*. 2006, *27*(10),1484-93.
- Morrison, R. G., Krawczyk, D., Holyoak, K. J., Hummel, J. E., Chow, T., Miller, B., et al. (2004). A neurocomputational model of analogical reasoning and its breakdown in frontotemporal dementia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*, 260–271.
- Morrison, R. G., Dumas, L. A. A., & Richland, L. E. (2011). A computational account of children’s analogical reasoning: balancing inhibitory control in working memory and relational representation. *Developmental Science*, *14*(3), 516-529.
- Morton, J. B., & Munakata, Y. (2002). Active vs. latent representations: a neural network model of perseveration, dissociation, and decalage. *Developmental Psychobiology*, *40*, 255-265.
- Moutier, S. (1997). Biases de raisonnement déductif et inhibition chez l'enfant d'âge scolaire. *Archives De Psychologie*, *65*(255), 279-292.

- Moutier, S., Plagne-Cayeux, S., Melot, A., & Houdé, O. (2006). Syllogistic reasoning and belief-bias inhibition in school children: evidence from a negative priming paradigm. *Developmental Science*, 9(2), 166-172.
- Munakata, Y., & Yerys, B. E. (2001). All together now: When dissociations between knowledge and action disappear. *Psychological Science*, 12, 335-337.
- Norman W, Shallice T. 1986. Attention to action. In: Davidson RJ, Schwartz GE, Shapiro D, editors. *Consciousness and self regulation: Advances in research and theory*, vol. 4. New York: Plenum, p 1–18.
- Parker, S. T., & McKinney, M. L. (1999). *Origins of intelligence: the evolution of cognitive development in monkeys, apes, and humans*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- Picq, J.L. (2007). Aging affects executive functions and memory in mouse lemur primates. *Experimental Gerontology* 42(3): 223-232.
- Premack, D. (1983). The codes of man and beast. *Behavioral and Brain Sciences*, 6, 125-137.
- Rattermann, M. J., & Gentner, D. (1998a). More evidence for a relational shift in the development of analogy: Children's performance on a causal-mapping task. *Cognitive Development*, 13(4), 453–478.
- Rattermann, M. J., & Gentner, D. (1998b). The effect of language on similarity: The use of relational labels improves young children's performance in a mapping task. *Advances in analogy research: Integration of theory and data from the cognitive, computational, and neural sciences*, 274–282.
- Rey, A., Perruchet, P., & Fagot, J. (2012). Centre-embedded structures are a by-product of associative learning and working memory constraints : Evidence from baboons (*Papio papio*). *Cognition*, 123, 180-184.
- Richland, L. E., & Burchinal, M. R. (2013). Early Executive Function Predicts Reasoning Development. *Psychological science*, 24(1), 87-92.

- Richland, L. E., Morrison, R. G., & Holyoak, K. J. (2006). Children's development of analogical reasoning: Insights from scene analogy problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, *94*(3), 249–273.
- Ripoll, T. (1992). La recherche sur le raisonnement par analogie : objectifs, difficultés et solutions. *L'année psychologique*, *92*(2), 263–288.
- Roberts, A. C., & Wallis, J. D. (2000). Inhibitory Control and Affective Processing in the Prefrontal Cortex: Neuropsychological Studies in the Common Marmoset. *Cerebral Cortex*, *10*, 252-262.
- Sakagami, M., Tsutsui, K., Lauwereyns, J., Koizumi, M., Kobayashi, S., & Hikosaka, O. (2001). A code for behavioral inhibition on the basis of color, but not motion, in ventrolateral prefrontal cortex of macaque monkey. *The Journal of Neuroscience*, *21*, 4801-4808.
- Scheuner, N., Bonthoux, F. X. O., Cannard, C., & Blaye, A. X. S. (2004). The role of associative strength and conceptual relations in matching tasks in 4- and 6-year-old children. *International Journal of Psychology*, *39*(4), 290–304.
- Son, J., Smith, L., Goldstone, R., & Leslie, M. (2012). The importance of being interpreted: Grounded Words and children's relational reasoning. *Frontiers in Psychology*. *3*(45), 1-12.
- Steege, S., & De Neys, W. (2012). Belief inhibition in children's reasoning: Memory-based evidence. *Journal of Experimental Child Psychology*, *112*, 231-242.
- Thibaut, J. P., & French, B. (soumis) The temporal dynamics of analogy-making in adults and children.
- Thibaut, J. P., French, R., & Vezneva, M. (2010a). The development of analogy making in children: Cognitive load and executive functions. *Journal of Experimental Child Psychology*, *106*(1), 1–19.
- Thibaut, J. P., French, R., & Vezneva, M. (2010b). Cognitive load and semantic analogies: Searching semantic space. *Psychonomic Bulletin & Review*, *17*(4), 569–574.
- Thibaut, J. P., French, R., Mussault, S., Gérard, Y., & Glady, Y. (2011). In the Eyes of the Beholder: What Eye-Tracking Reveals About Analogy-Making Strategies in Children and Adults,

- Proceedings of the thirty-third Annual Meeting of the Cognitive Science Society. 1–6.
- Thibaut, J. P., French, R., Vezneva, M., Gérard, Y., & Glady, Y. (2011). Semantic analogies by young children: testing the role of inhibition. In B. Kokinov, A. Karmiloff-Smith, & N. J. Nersessian (Eds.), *European Perspectives on Cognitive Science*. New Bulgarian University Press.
- Thompson, R. K. R., Oden, D. L., & Boysen, S. T. (1997). Language-naive chimpanzees (*Pan troglodytes*) judge relations between relations in a conceptual matching-to-sample task. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *23*, 31–43.
- Towse, J. N., Lewis, C., & Knowles, M. (2007). When knowledge is not enough: The phenomenon of goal neglect in preschool children. *Journal Of Experimental Child Psychology*, *96*(4), 320-332.
- Truppa, V., Piano Mortari, E., Garofoli, D., Privitera, S., & Visalberghi, E. (2011). Same/Different Concept Learning by Capuchin Monkeys in Matching-to-Sample Tasks. *PLoS ONE*, *6*(8): e23809.
- Viskontas, I. V., Morrison, R. G., Holyoak, K. J., Hummel, J. E., & Knowlton, B. J. (2004). Relational Integration, Inhibition, and Analogical Reasoning in Older Adults. *Psychology and Aging*, *19*(4), 581–591. doi:10.1037/0882-7974.19.4.581
- Washburn, D. A. (1994). Stroop-like effects for monkeys and humans: Processing speed or strength of association? *Psychological Science*, *5*(6), 375-379.
- Weed, M.R., Bryant, R., & Perry, S. (2008). Cognitive development in macaques: attentional set-shifting in juvenile and adult rhesus monkeys. *Neuroscience*, *157*, 22–8.
- Yerys, B. E., & Munakata, Y. (2006). When labels hurt but novelty helps: Children's perseveration and flexibility in a card-sorting task. *Child Development*, *77*, 1589-1607.
- Zelazo, P. D., Craik, F. I. M., & Booth, L. (2004). Executive function across the life span. *Acta Psychologica*, *115*, 167-183.

Légendes des figures

Figure 1. Illustration d'un essai utilisé par Goswami et Brown (1990)

Figure 2. Temps de fixation des différents types de stimuli en fonction de l'âge, de la partie de l'essai. Un essai est décomposé en 3 tranches correspondant au début, au milieu et à la fin de l'essai. Les stimuli sont A, B, C, Target (réponse analogique), DisSem (le distracteur sémantique lié à C présent dans l'ensemble des solutions proposées) et DisNR (deux distracteurs non reliés à C présents dans l'ensemble des solutions. Le temps représenté correspond au temps moyen passé à analyser ces deux stimuli). On voit qu'au début de l'essai (tranche 1), les adultes analysent A et B et négligent tous les autres stimuli. Dans les tranches suivantes ils convergent rapidement sur la solution Target. Les enfants, par contre, au début de l'essai (tranche 1), regardent plus C que les autres stimuli mais passent aussi du temps sur A et B, la réponse Target et le distracteur sémantique. Leur attention est donc moins ciblée. D'autres analyses confirment le rôle attracteur de C pendant une partie importante du temps de résolution.

Figure 3. Tâches de flexibilité cognitive (WCST) et d'inhibition (Hick). **A.** Dans la tâche de flexibilité cognitive (WCST), les affichages comportent trois stimuli différents et le babouin doit sélectionner la forme cercle quelle que soit sa couleur. Lorsqu'il a atteint le critère de réussite, la règle change et il doit désormais choisir les stimuli de couleur jaune. Cette procédure se poursuit en changeant régulièrement le stimulus associé à la récompense. La flexibilité cognitive est mesurée par les pourcentages de réponses correctes pour les 25 essais suivant chaque changement de règle (voir Bonté et al., 2011). L'inhibition (Figure 3B) a été testée par la tâche de Hick (voir également Fagot et al., 2011). Dans cette tâche, le babouin touche la croix de fixation ⁽¹⁾ puis s'affichent plusieurs carrés blancs ⁽²⁾ marqués d'un signe « X ». Un carré devient alors la cible ⁽³⁾ lorsqu'un signe « + » s'inscrit en son centre. Le babouin doit alors relâcher la croix de fixation pour toucher la cible. L'inhibition est mesurée par le pourcentage de réponses où l'animal parvient à sélectionner correctement la cible (voir Fagot et al., 2011).

Figure 4. A. Tâche d'appariement relationnel. Représentation de la tâche d'appariement relationnel proposée par Fagot & Thompson (2011). La paire à éviter pour la réponse partage un attribut (ici un rectangle) avec la paire source. La paire à choisir présente la même relation (ici une relation d'identité) avec la paire source. **B. Variabilité interindividuelle dans la tâche d'appariement relationnel.** Scores obtenus par 16 babouins dans la tâche de RMTS par Fagot & Thompson (2011). On notera que 6 d'entre eux atteignent un taux de réussite de 80% correct, ce qui révèle des compétences d'analogie.

Figure 5. Corrélations des performances d'appariement relationnel avec les tâches de WCST et Hick. Corrélations de Pearson et régression linéaire entre les performances en appariement relationnel et notre mesure de flexibilité cognitive (Figure 5A). Corrélations de Pearson et régression linéaire obtenue chez le babouin entre les performances en appariement relationnel et nos mesures d'inhibition (Figure 5B).